

超高速LSI製造プロセスに関する研究

著者	山田 圭一
号	1571
発行年	1993
URL	http://hdl.handle.net/10097/6844

氏 名	山 田 圭 一
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	超高速 L S I 製造プロセスに関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 大見 忠弘
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大見 忠弘 東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 坪内 和夫 東北大学助教授 森田 瑞穂

論 文 内 容 要 旨

超 LSI デバイスの微細化は、動作速度・集積度の向上をもたらす反面、配線・コンタクト寸法の縮小に伴う抵抗の増加を招く。特に、コンタクト抵抗は、デバイスの電流駆動力を制限する寄生抵抗として作用し、超 LSI の高速化を妨げるため、その徹底的な低減が必要とされる。しかしながら、超低抵抗コンタクト形成に関する系統的な研究は充分にはなされていなかった。従来技術によるコンタクト形成プロセスにおいては、高濃度 Si や金属表面の酸化防止の問題が未解決であり、十分な低抵抗化は達成されていなかった。

本研究においては、超高速 LSI の実現に不可欠である超低抵抗金属-Si 接合形成技術の確立を目的として、超低抵抗コンタクトの設計指針を示し、その実現に不可欠な超高品質金属シリサイド形成技術を開発し、超低抵抗コンタクト電極形成技術を確立した。

本論文は、これらの研究成果をまとめたもので全 6 章構成である。

第 1 章では、LSI の超高速化に不可欠である半導体デバイスの微細化の進展と共に、超低抵抗金属-半導体コンタクトの必要性が益々大きくなることを述べるとともに、金属-半導体コンタクト形成プロセスにおける問題点を指摘している。さらに、従来技術によるコンタクト形成プロセスにおける問題点を挙げ、超低抵抗コンタクトの形成方法の概要を述べている。

第 2 章では、超高速 CMOS デバイスに必要とされるコンタクト抵抗値に関する考察を行っている。超低抵抗コンタクト形成の設計指針を示し、形成されるコンタクト構造の抵抗値の理論計算を

行って、実現可能なコンタクト抵抗値を算出した結果について述べている。MOSFET 形成プロセスにおける加工寸法の微細化とゲート絶縁膜への高誘電体材料の利用、等のプロセス技術の向上により、相互コンダクタンス g_m の非常に高い、電流駆動能力の大きなトランジスタが可能となる。予測される実現可能な g_m の値として、1 トランジスタ当たり 3.4 mS という値を算出した。

一方、ソースのコンタクト抵抗はチャネルに対して直列に入る寄生抵抗として作用し g_m の低下をもたらす。コンタクトのサイズが 0.1 μm の領域において g_m の劣化を抑制するために要求されるコンタクト抵抗率 ρ_c の計算を行った結果、抵抗率は $2.9 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下でなければならないことが明らかとなった。

超低抵抗コンタクトの形成の為に要求される項目は、(1)金属-半導体接合の障壁高さの低減化、(2)金属-半導体界面の半導体のキャリア濃度の最大化、という2点である。

これらの要求を実現するための超低抵抗コンタクト形成の指針は以下の通りである。界面に酸化物層の存在しない超清浄な金属-半導体接合の形成により障壁高さの低減化が可能である。また、CMOSLSI コンタクトにおいては、製造工程の簡略化のため、n型、p型の両方に対して同一工程でコンタクト金属を形成することが要求される。従って、n型、p型の両者に対して障壁高さを低くするためには、n型、p型各々に対する障壁高さ Φ_{bn} 、 Φ_{bp} が半導体の禁制帯幅 E_g の半分であることが要請される。金属-Si 界面でのキャリア濃度を最大とするには、シリサイド化プロセスが必要とされる。イオン注入により形成された、半導体表面から数 10 nm 程度深い位置の最大濃度部に接合界面を形成するためである。

障壁高さを $\Phi_{bn} = \Phi_{bp} = 0.5 E_g$ 、ドーピング濃度を実用的なプロセスで可能な値 $N_D = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ とした場合の、金属-Si 接合のコンタクト抵抗率の計算を行ったところ、 $10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}^2$ のオーダーのコンタクト抵抗率が実現可能であることが示された。

第3章では、Si 表面に高濃度ドーピングされた Si 薄膜を形成し、金属-Si コンタクト形成実験を行った結果について述べている。535°C という従来技術よりも低温での高濃度ドーピング Si のエピタキシャル成長技術を開発し、酸化膜フリーコンタクト形成技術と組み合わせ、金属-Si コンタクト抵抗の評価を行った。

Si のエピタキシャル成長温度の低温化を妨げるものは、Si 表面での自然酸化膜の成長である。成膜直前の超清浄な Si 表面での自然酸化膜の成長を抑制する方法として、ガス分子前照射処理が非常に有効であることが、自由分子流照射型 CVD 法による Si の低温エピタキシャル成長実験から新たに見いだされた。昇温された超清浄な Si 表面に対して Si_2H_6 ガス分子あるいは PH_3 ガス分子の前照射処理を行うことにより、Si 表面での酸化膜の成長が抑制されることが、X線光電子分光法 (XPS) による測定結果から見いだされた。ガス分子照射により Si 表面への H_2O 、 O_2 分子の吸着を抑制することが酸化膜の成長を抑える効果を有することが推測される。ガス分子前照射処理を施した場合と施されない場合とで、550°C での P (燐) ドープ Si の CVD 成膜を行い、形成された Si 薄膜の結晶性の比較実験を反射電子線回折を用いて行ったところ、ガス分子前照射処理を行って形成された P ドープ Si において、Si 薄膜の結晶性が改善されていることが明らかとなった。特に、室温から成膜温度に至るまでの間 PH_3 ガス分子前照射処理を行って P ドープ Si の CVD 成膜を行っ

た結果、535℃という従来技術よりも低温において、P原子が $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ にドーピングされたSiのエピタキシャル成長が可能であることが見いだされた。また、 PH_3 ガス分子照射されたSi表面にはP原子が高濃度に吸着することも併せて新たに見いだされた。 PH_3 ガス分子前照射処理を用いたPドーピングSiのCVDによるエピタキシャル成長法と酸化膜フリー金属薄膜形成法とを組み合わせ、金属-n⁺-Siコンタクトの形成を行い、コンタクト抵抗率の測定を行った結果 $1.1 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ という値が得られ、従来技術との比較で約50%の低減化に成功したことが確認された。しかしながら、この方法では十分なコンタクト抵抗の低減化は達成されていない。Si表面の高濃度化処理を行った後に金属を形成するよりも、Si中のドーピング濃度の最大となる部分に金属-Si界面を形成する方が実用的であることが確認された。従って、超低抵抗コンタクト形成には、金属シリサイド形成反応の利用が必要とされることが確認された。

第4章では、高品質金属薄膜形成技術を開発し、 TaSi_2 -Si接合の形成実験を行った結果について述べている。低エネルギーイオン照射型金属薄膜形成プロセスと酸化膜フリー金属成膜プロセスとを組み合わせることにより、接合の電気特性及びコンタクトホールへの被覆性とが良好なコンタクト形成技術が可能であることが明らかとなった。酸化膜フリー金属成膜プロセスとは、Si基板の洗浄・搬送から金属薄膜形成までの全てを、 H_2O 、 O_2 濃度を数ppb以下に抑えた超高純度不活性ガス中あるいは超高真空中において行うプロセスである。さらに、金属成膜直前には H_2/Ar プラズマプロセスによる低エネルギーイオン照射クリーニングを行い、イオン照射による損傷を発生させることなくSi表面への吸着分子を除去し、酸化膜や吸着汚染物層の存在しない超清浄界面を有する金属/Si接合の形成が可能となった。また、イオンの照射エネルギーやイオンの照射フラックスを精密に制御することにより、コンタクトホールへの成膜において段差被覆性の向上が可能となることが明らかとなった。イオンの照射エネルギーを高くすることなく、イオンの照射フラックスを増加させることで、コリメーションや基板加熱することなくコンタクトへの被覆性が改善されることが段差被覆率の評価結果から定量的に示された。

低エネルギーイオン照射型金属薄膜形成プロセスと酸化膜フリー金属成膜プロセスとを組み合わせ、Ta-Si接合及び熱処理を施して TaSi_2 -Si接合の形成を行い、電流-電圧特性の測定を行った結果、良好なダイオード特性を有する金属-Siコンタクトの形成が可能であることが確認された。接合の障壁高さを求めたところ、n, p-Siに対してSiの禁制帯幅の約半分であり、CMOSLSI超低抵抗コンタクト形成プロセスに要求される条件を満たすことが実験結果から明らかとなった。

第5章では、高濃度Si上にTa薄膜、さらに表面にnドーピングSi薄膜の連続成膜を行った後に、ドーパントのイオン注入を行い熱処理を施することで、酸化膜等の汚染の全く無い高濃度Siとシリサイドとの接合構造形成プロセスを開発し、超低抵抗コンタクト電極形成技術を確認した結果について述べている。金属表面は、大気中・超純水中・溶液中のいずれにおいても、非常に酸化されやすい。表面に形成された酸化物は、金属シリサイド形成において酸素不純物としてシリサイド/Si構造中に混入し、コンタクト抵抗の増加をもたらす。従って、超低抵抗コンタクトの形成プロセスの実現には、金属表面の酸化防止のための保護層の形成が必要とされる。Si上に金属薄膜を形成後、連続してnドーピングSi薄膜の形成を行って金属表面を完全にSiで覆うことで、酸素不純

物の混入が徹底的に抑えられた超清浄金属-Si コンタクト形成プロセスが可能となったことが、XPS による酸素不純物の深さ方向分析から明らかとなった。超清浄 Si/Ta/Si 構造に対して、ドーパント原子のイオン注入を行った後に 450°C の熱処理を加えて TaSi₂/Si 構造を形成することで界面でのドーパント濃度を最大として、超低抵抗コンタクト電極構造の形成が可能となること、コンタクト抵抗の測定結果から明らかとなった。TaSi₂/n⁺Si コンタクトの場合で $3.3 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、TaSi₂/p⁺Si コンタクトの場合で $7.5 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}^2$ というコンタクト抵抗率が得られている。n 型、p 型共に従来技術により形成された場合と比較して 2 桁低いコンタクト抵抗率となっている。本研究により確立されたコンタクト形成プロセスにより、CMOSLSI コンタクトの超低抵抗化が可能であることが明らかとなった。

イオン注入と 450°C 低温アニールにより形成された接合深さが 60nm の極浅 n⁺p 接合へのコンタクト形成を行い、pn 接合の逆方向リーク電流の測定を行った。その結果、シリサイド形成に伴う結晶欠陥や不純物汚染により生じるリーク電流値の増加は確認されず、超微細 MOSFET のコンタクト形成プロセスへの応用が可能であることも見いだされた。

第 6 章は結論であり、第 2 章から第 5 章までを通して得られた結果を総括している。

本研究により確立された超高品質金属シリサイド-Si 接合形成プロセスは、従来技術においては実現が非常に困難であった超低抵抗コンタクト電極形成を可能とするものであり、ULSI の超高速化に対して多大なる貢献をなすものである。

審 査 結 果 の 要 旨

超 LSI デバイスの微細化に伴い、高速動作特性を向上させるための低抵抗コンタクト形成技術が非常に重要となっている。しかし、従来の金属・シリコン接合形成技術においては、半導体表面や金属表面の酸化の制御が不充分であったためコンタクト抵抗の低減は達成されず、金属・シリコン低抵抗コンタクト形成プロセスの系統的な研究はなされていなかった。

著者は、超高速 LSI デバイスの実現に不可欠である金属・シリコン接合形成プロセスにおいて、CMOSLSI 用コンタクト構造の設計指針を提案し、酸素不純物の非常に少ない金属シリサイド形成法とドーピング濃度分布精密制御法を開発し、超低抵抗コンタクト電極形成方法を実験的に明らかにした。本論文は、これらの研究成果をとりまとめたもので、全文 6 章より成る。

第 1 章は、序論である。

第 2 章では、超低抵抗金属・シリコンコンタクト構造の設計指針を提案し、コンタクト抵抗値の理論計算を行い、実現可能なコンタクト抵抗値を始めて明らかにした結果について述べている。

第 3 章では、高濃度ドーパ Si の低温エピタキシャル成長技術と酸化膜フリーコンタクト形成技術を開発し、これらを組み合わせて形成した金属・Si コンタクト抵抗の評価を行った結果について述べている。

第 4 章では、低エネルギーイオン照射スパッタ成膜技術と酸化膜フリーコンタクト形成技術を用いた TaSi₂・Si 接合の形成を行った結果について述べている。TaSi₂・Si 接合は、理論から予想される電気特性と殆ど一致する特性を示すことを実験的に明らかにしている。また、TaSi₂・Si 接合の障壁高さは、n 型、p 型 Si に対して Si の禁制帯幅の約 1/2 であり、CMOSLSI の低抵抗コンタクト形成に要求される条件を満たすことを実験結果から明らかにしている。これは、重要な知見である。

第 5 章では、高濃度 Si 上に Ta 薄膜、表面保護層であるノンドープ Si 薄膜を連続成膜した後、電極用不純物原子のイオン注入と低温熱処理を行うことにより、酸素不純物汚染が低減され、かつ Si 表面の電子・ホール濃度が最大となる TaSi₂・Si 接合の形成プロセスを開発し、超低抵抗コンタクト電極を実現した結果について述べている。この方法により、接触抵抗率が従来より 1 桁以上低い $3.3 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}^2$ のコンタクトを形成できることを実証している。これは、実用上重要な成果である。

第 6 章は、結論である。

以上要するに本論文は、金属シリサイド・高濃度 Si 接合形成プロセスにおけるコンタクト抵抗支配因子を明らかにして、超高速 LSI の実現に不可欠な超低抵抗コンタクト電極形成方法を開発したもので、半導体電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。